

Eltérő nedvességviszonyok és nitrogén-tápanyagellátási módok hatása a talaj NO_x és CO₂ produkciójára, termékenységre és mikrobiológiai aktivitására szántóföldi és modellkísérletben (72926, 73326, 73768 OTKA konzorciumi kutatás záróbeszámolója)

1. Bevezetés, előzmények

A Szent István Egyetem, a Pannon Egyetem és az MTA Agrártudományi Kutatóközpont kutatócsoportjai a témakörben folytatott korábbi együttműködésükre alapozva, 2008-ban kezdték meg jelen konzorciális OTKA pályázatuk kidolgozását. A talaj/növény/légkör rendszerben lejátszódó egymásba kapcsolódó C/N-ciklusok hazai kutatásai korábban az optimális növényi tápanyagellátás módszereinek kidolgozására irányultak, azonban a nemzetközi trendeknek megfelelően egyre nagyobb hangsúlyt kaptak a környezeti szempontok, a nitrát kimosódás (*COUNCIL DIRECTIVE of 12 December 1991*) és a biogén eredetű üvegház-hatású gázok (N₂O, CO₂) kibocsátásának minimalizálása (*GALBALLY és ROY, 1978*) is. Jelen pályázatunk alapgondolata az volt, hogy a globális klímaváltozás várható hazai következményére, a szélsőséges ingadozások gyakoriságának növekedésére a mezőgazdaságban is fel kell készülnünk. E hatásokra a talaj szervesanyag-forgalmával biológiailag szorosan kapcsolt N-ciklusok reagálnak legérzékenyebben. Az eltérő víz- és nitrogén-ellátási (ásványi-N, illetve szervesstrágyázás) viszonyok jelentősen befolyásolják a növénytáplálás hatékonyságát, s a talajban a C/N- ciklusokat. Ennek eredményeként megváltozhat a talajban az üvegházhatású gázok, a CO₂ és a nitrogén-oxidok képződése és emissziója is. Ökológiai viszonyainkra jellemző kvantitatív adatok a CO₂ és a nitrogén-oxidok képződéséről mezőgazdaságilag használt talajokban kutatásaink kezdetéig nem jelentek meg. Ezzel szemben az első közlemény a talajok nitrogén-monoxid és az ebből származó magasabb oxidációfokú nitrogén-oxidok (közös jelölés szerint NO_x) emissziójáról 1978-ban jelent meg (*GALBALLY és ROY, 1978*). Ettől kezdve e témakörben egyre növekvő számban jelentek meg újabb közlemények globális, regionális és lokális vizsgálatokról, és emissziós modellek kifejlesztéséről. Az 1998-ban megalakult *IPCC*, s az 1990-ben létrehozott *GEIA NETWORK* biztosították a globális együttműködés kereteit a klímaváltozás antropogén forrásainak kutatásában (*2nd IPCC ASSESSMENT REPORT, 1995*). Az Európai Közösség Közös Kutatóközpontjának Környezetvédelmi Intézete 1970 óta gyűjti az üvegházhatású gázok és légszennyezők emissziójára vonatkozó adatokat az *EDGAR* adatbázisban, melyet 10X10 km felbontású térképeken statisztikai jelentések és tudományos információk alapján vezetnek. Ehhez kapcsolódott a Kyoto Egyezmény célkitűzéseinek verifikálását szolgáló, 2010-ben zárult AFOLUDATA Információs Rendszer (*GHG AFOLU*) programja is. Mindezek a projektek és adatbázisok elsősorban légkör-kémiai szempontok szerint jöttek létre, s napjainkig növekedési trendet regisztrálnak a CO₂ és nitrogén-oxidok kibocsátásában (*YANG et al., 2011; ROWLINGS et al., 2010*). Az üvegházhatású gázok globális emissziójában mintegy 20%-ra becsülik a mezőgazdasági aktivitásból eredő hányadot (*LOKUPITIYA et al., 2005*), amelynek elsődleges forrása a talajok biogén eredetű gáz emissziója (*GANZEVELD, 2005*). Ezek a folyamatok jelentős függést mutatnak a talaj biogeokémiai és fizikai tulajdonságaitól (pl. mikroba fajösszetétel, talajtextúra, talajnedvesség-állapot, pH, redoxipotenciál, tápanyag-ellátottság) (*CONRAD, 1996*). Ugyanakkor a földhasználat (művelés, öntözés, trágya- és műtrágya alkalmazás, talajtömörödés, növények vetése és betakarítása) is jelentős mértékben befolyásolja a gázemissziót (*FROLKING et al., 1998*), s az atmoszférába irányuló NO_x fluxust jelentősen befolyásolja a növénytakaró földfeletti részével lezajló kölcsönhatás is (*GANZEVELD et al., 2002*). A globális felmérések szerint a ritkán lakott és vidéki térségekben a talaj biogén NO-gáz emissziója határozza meg a légkörbe jutó NO_x fluxust, míg az iparosodott területeken a fosszilis tüzelőanyagokból származik a 20-25 TgN/év -re becsült NO_x emisszió túlnyomó része (*DELMAS et al., 1997*). A talaj biogén eredetű NO-forrás-bebecslések az évi 9,75 Tg N/év (*POTTER et al., 1996*) és 21 Tg N/év

(DAVIDSON és KINGERLEE, 1977) tartományba estek, azonban azok a becslések, amelyek figyelembe vették a lombkorona szinten történő megkötődést ennél 50%-kal kisebb értékeket adnak (YINGER és LEVY, 1995; GANZVELD *et al.*, 2002; HUTCHINSON *et al.* 1997). Az állandó életközösséget képviselő erdei talajok esetében elvileg ezek a folyamatok megbízhatóbban monitorozhatók, mint mezőgazdasági területeken. SCHINDLBACHER *et al.* (2004) bolygatatlan erdei talajoszlópokkal végzett laboratóriumi kísérlete szerint a talajhőmérséklet és talajnedvesség kezeléskombinációk lehetővé tették az NO és N₂O gázemisszió változásainak értelmezését, s az NO-emisszió értékek 1,3-608,9 µg (NO-N) m⁻² h⁻¹, az N₂O-emisszió értékek pedig 172±42 µg (N₂O-N) m⁻² h⁻¹ tartományba estek. HALL *et al.* (2008) mérései szerint az N₂O kibocsátás fluxusa a városi öntözött és műtrágyázott gyepeken 18-80 µg (N) m⁻² h⁻¹ tartományba esett, míg a gondozott száraz és sivatagi maradványterületeken 2,5-22 µg (N) m⁻² h⁻¹, illetve 3,7-14 µg (N) m⁻² h⁻¹ értékeket mértek. GALBALLY *et al.* (2008) szerint szemiárid (275 mm/év) viszonyok között, őshonos vegetáció, illetve mezőgazdasági területen, a meteorológiai adatok, a talaj jellemzők, a trágyák/műtrágyák alkalmazása és a nedvességadatok függvényében mérték a gáz-fluxusokat statikus kamra módszerrel. Az adatokból számított emissziók CO₂ esetében (-80)-75 µg (C) m⁻² s⁻¹; CH₄ esetében (-10)-5 ng (C) m⁻² s⁻¹; CO esetében (-6)-38 ng (C) m⁻² s⁻¹; N₂O esetében (-0,5)-5,5 ng (N) m⁻² s⁻¹; NO_x esetében 0,5-1,7 ng (N) m⁻² s⁻¹ határok közt változtak. Különösen fontos a hőmérséklet és a talajnedvesség figyelembevétele, STEWART *et al.* (2008) nedvesített talajok felett 0,8-1,4 ppb; a háttér (száraz talaj) fölött 0-0,2 ppb NO_x-szinteket mértek. MARTIN *et al.* (1998) vizsgálatai szerint temperált réteken az NO_x-emisszió becslések értéke a 0,003-101 ng (N) m⁻² s⁻¹ tartományban változott, átlagos értéke 4,17 ng (N) m⁻² s⁻¹ volt, s ebből a gyepek ökoszisztémákra 1 Tg (N)/év NO_x-N globális emissziót számoltak. YAN *et al.* (2005) szerint az 50 Tg (N)/év-re becsült globális NO_x-N emisszióban a talaj hozzájárulása nagyon bizonytalan. A leltározási módszerrel, a folyamat alapú modellezéssel, illetve az empirikus modellezéssel kapott emisszió becslések nagymértékben különbözhetnek. A leltár módszer és az egyszerű empirikus modell nem veszi figyelembe a talaj-tulajdonságok változékonyságát, míg a folyamat-alapú modell kénytelen leegyszerűsíteni a kritikus mikrobiológiai folyamatokat, ha nagy területekre használjuk a megfelelő (megkívánt) paraméterek hiányában. Az eddigiekből levonható az a következtetés, hogy a mezőgazdasági talajhasználat jelentősen hozzájárul a szén- és nitrogén-oxidok légköri emissziójához és abszorpciójához, s az eddigi globális leltárok és modellek a biogén eredetű emisszióban növekedési tendenciát mutatnak, bár a becsléseknek rendkívül nagy a bizonytalansága. E bizonytalanság több okra vezethető vissza:

- A becslési modellek nem veszik kellően figyelembe, hogy a természetes ökoszisztémák egymással sokszorosán összekapcsolt szén és nitrogén ciklusait a mezőgazdasági használat jelentősen megváltoztatja, s megbízható becslésekhez csak a termelési ciklusok teljes szén- és nitrogén mérlege alapján juthatunk.
- A biogén eredetű gázemisszió monitorozása számos módszertani problémával jár. Nagy területeken a gázemisszió monitorozása csak távérzékelési technikákkal lehetséges, ugyanakkor a felszíni referencia mérésekhez a megfelelő mintavételi pontok és gázanalitikai eszközök csak korlátozott számban telepíthetők, s így a referencia mérések reprezentativitása nehezen biztosítható.
- A talajokban az üvegház hatású gázok képződéséhez és elnyeléséhez vezető folyamatokat jelentősen befolyásolják az ökológiai, környezeti és agrotechnikai tényezők, s ezek térbeli változatossága és időbeli ciklikus változása ugyancsak megnehezíti a megbízható becslésekhez szükséges monitorozás megvalósítását.

2. Célkitűzések

Az előzményekben vázolt problémákból kiindulva, s építve a 2005-ben befejezett T 35189 számú, „Különböző nitrogénforrások és nehézfémek hatásának értékelése a talaj nitrogén tartalmú gázemissziójára” című témánkra határoztuk meg jelen programunk legfőbb célját. Olyan kísérleti rendszer kidolgozását és megvalósítását, amely lehetővé teszi a magyarországi ökológiai és klimatikus viszonyok között a mezőgazdaságban használt talajokban az üvegház hatású gázok képződése és a növényi tápanyag ellátás közötti összefüggések feltárását, s megteremtene egy olyan adatbázist, ami lehetőséget nyújt az emisszió becslésére. Kísérleti rendszerünket a Keszthelyen 1963-ban beállított „Szerves- és Műtrágyák Hatását Összehasonlító Tartamkísérlet”-re építettük (HOFFMANN *et al.*, 2008). A tartamkísérlet kiválasztott kezeléseiből vett talajokkal 2008-, 2009- és 2010-ben nagyméretű tenyészedenyekben mezokozmosz kísérleteket állítottunk be, amelyekben a talajban 20 cm mélységben és a felszínen elhelyezett gázgyűjtő csapdákból a tenyészidő folyamán vett gázmintákból mértük a CO₂ és N₂O gázok képződését. A tartamkísérlet szegélyparcelláiból kiemelt bolygatatlan talajoszlopokkal MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet Örbottyáni Kísérleti telepén 2008-, 2009-, 2010- és 2011-ben végzett kísérletekben tanulmányoztuk a CO₂ és N₂O gázok képződését 20 cm, 40 cm és 60 cm mélységben és a kilépését a felszínen. Mind a tenyészedeny kísérletben, mind a bolygatatlan talajoszlopokban olyan kezeléseket alkalmaztunk, amelyek lehetővé tették az ásványi- és istálló trágyák, valamint a talajba bedolgozott növényi szerves anyag hatásának tanulmányozását a talajlevegőben felhalmozódó CO₂ és N₂O gázok mennyiségének nyomonkövetését a tenyészidő folyamán, s ezzel párhuzamosan lehetőséget nyújtott a talaj mikrobiológiai aktivitásának követésére. A tenyészedeny kísérletekben a talajnedvességet állandó értékre állítottuk be, s a hőmérsékletet folyamatosan regisztráltuk. A tápanyagellátás, a vízellátás, a hőmérséklet és nehézfém-szennyezés hatását a talaj-mikrobiológiai folyamatok eredményeként bekövetkező NO_x, N₂O és CO₂ gázemisszióra a Szent István Egyetem kutatócsoportja a fenti két kísérlethez kapcsolódó laboratóriumi mikrokozmosz kísérletek sorozatával értékelte, amelyeket 200 g homogenizált talajjal 1,2 dm³ térfogatú zárt edényekben végeztünk. A mikrokozmosz kísérleti rendszer fejlesztésével párhuzamosan e csoport célkitűzése volt a gázprodukciónak és nehézfém-szennyezés értékeléséhez szükséges analitikai és kromatográfiai módszerek fejlesztése, kalibrálása és validálása. A szén-dioxid és dinitrogén-oxid mérését gázkromatográfiai módszerrel végeztük. Ehhez gáztömör fecskendőket használtunk, amellyel 0,250 cm³ gázmintát közvetlenül a gázkromatográfba (HP 5890, illetve Fisons GC8000) injektáltuk. A komponensek elválasztása Porapak Q oszlopon történt. A szén-dioxidot hővezető-képességi, a dinitrogén-oxidot elektronbefogósos detektorral mértük, három ismétlésben. A mennyiségi meghatározás külső standarddal készített egyponthus kalibráció alapján történt (KAMPFL *et al.*, 2007). NO_x-méréseket csak a laboratóriumi modellkísérletekben végeztünk, ahol a mikrokozmosz-gáztérből vett mintát *in situ* tudtuk injektálni a kemilumineszcenciás detektorba. A nehézfém szennyezés hatásainak értékeléséhez szükségünk volt a talajba juttatott nehézfémek biológiai hozzáférhetőségét becslő frakcionálási módszerek továbbfejlesztésére szolgáló szekvens extrakciós technikák validálására.

3. A kutatási program végrehajtása

Előkészítő kutatásainkat 2006-ban és 2007-ben a pályázati szakasz alatt megkezdtük, s így a 2008-ban támogatást nyert jelen pályázatunk megkezdésekor a laboratóriumi mikrokozmosz kísérletek alkalmazása, az analitikai módszerfejlesztés és a tartamkísérlet értékelése területén részben már publikált eredményekből tudtunk kiindulni. Ezeken a közleményeken vagy a lezárt 35189 számú OTKA támogatást jelöltük meg, vagy - új szerződés hiányában - még nem tudtuk feltüntetni az OTKA támogatást. Kutatásainkat 2008-ban, 2009-ben, 2010-ben és

2011-ben munkatervünknek megfelelően folytattuk, az abban leírt munkamegosztásnak megfelelően, 2012-ben az adatok feldolgozására, publikálására és kiegészítő – részben már a téma továbbfejlesztését szolgáló metodikai vizsgálatok céljára – hat hónapos hosszabbítást kértünk, s így kísérleti munkánkat 2012. 06. 30-án zártuk. A hosszabbítás időszakának kezdetén konzorciumunk szenior kutatója Berecz Katalin tragikus autóbalesetben életét vesztette. Kiesése jelentős nehézséget okozott az általa irányított tenyésztedény kísérlet összegező értékelésében, s publikálásra történő előkészítésében. Emiatt a tenyésztedény, s a talajoszplop kísérletek hároméves összegező értékeléséről szóló publikációkat jelentésünkkel egyidejűleg tudtuk közlésre elküldeni (*HELTAI et al.*, 2012, *HOFFMANN et al.*, 2012a), az ezekben foglalt eredményeket azonban már jelentésünkbe beépítettük. Kutatási célkitűzéseink szerint építettük ki a Keszthelyen folyó fenti tartamkísérletre alapozott mezokozmosz (tenyésztedény és bolygatatlan talajoszplop) és mikrokozmosz kísérleti rendszert, s jelentősen előrehaladtunk az analitikai és értékelési módszerfejlesztésben is. Kutatásainkba Gödöllőn és Keszthelyen bekapcsoltunk több diplomamunka-készítő és doktorandusz hallgatót, s ez utóbbiak nemzetközi együttműködésben az Umweltforschungszentrum Halle intézményben a jelen témához kapcsolódó kutatásokat végezték.

4. Az eredmények összefoglalása, értékelése

Az üvegház hatású gázok képződése és a növényi tápanyag ellátás közötti összefüggésekre vonatkozó eredményeinket a három kísérleti szint (szántóföldi-tenyésztedény, bolygatatlan talajoszplop, laboratóriumi mikrokozmosz) szerint csoportosítva ismertetjük, s ezt követően ismertetjük a kapcsolódó kísérleti módszertani és az analitikai metodikai fejlesztések eredményeit.

4.1. Szántóföldi tartamtrágyázási-tenyésztedényes kísérlet

A Keszthelyen, Ramann-típusú barna erdőtalajon, 1963-ban beállított szántóföldi kísérlet alábbi kezeléseinek parcelláiról töltöttünk meg nagyméretű tenyésztedényeket: a/ növekvő adagú istállótrágyázás (35, 70, 105 t/ha/év), b/ ezzel ekvivalens hatóanyag-tartalmú NPK trágyázás, c/ ezek nagy NPK-adagokkal történő kombinációja (640, 360, 660 kg N, P₂O₅, K₂O/ha/év), szervesanyag-visszapótlással vagy anélkül. Az üvegházban, teljes érésig felnevelt növényeket szervrészekre bontva vizsgáltuk. A tenyésztedényekben, 20 cm talajmélységben gázcsapdákat helyeztünk el és a teljes vegetáció során hetente vett mintákban gázkromatográfiás módszerrel vizsgáltuk a talajlevegő CO₂- és N₂O-koncentrációját. A mintavételhez gáztömör Hamilton fecskendőt használtunk (10 cm³) és a gázmintát vákuumozott Exetainer csövekbe (Labco Ltd., UK) injektáltuk. A csöveket a mintavétel napján a laboratóriumba szállítottuk.

A három kísérleti év és a kétféle kísérleti szint terméseredményeit összegezve megállapíthatjuk, hogy a tenyésztedényes kísérletek esetében, az istállótrágyában mért NPK hatóanyag, műtrágya formában kiadva jelentősen hatékonyabb volt, mint maga az istállótrágya (*HOFFMANN és LEPOSSA*, 2012b). Hasonló eredményt adtak a szántóföldi kísérlet parcelláin betakarított termések is. Mindkét kísérletben egyértelműen a nagyadagú ásványi műtrágya, illetve istállótrágya–műtrágya kombinációk adták a maximális terméseket. A szántóföldi kísérlet sokéves eredményei azonban arra is rámutattak, hogy ez utóbbi kezelés-kombinációk magas tápanyagtartalmuk (172 kg N/ha⁻¹) miatt nem gazdaságosak. Optimális adagnak az 5 évre számított 70 t/ha⁻¹ istállótrágya hatóanyaga műtrágya formájában kiadva (88 kg N/ha⁻¹év⁻¹), bizonyult (*HOFFMANN, et al.*, 2012a). A tenyésztedényes kísérletekben a kukorica növények föld feletti szervrészei, valamint a teljes föld feletti növények, továbbá a szemtermések tömegei és ezek N-tartalma istállótrágyázáshoz képest az ekvivalens hatóanyag tartalmú műtrágyakezelések esetében szintén csaknem minden esetben szignifikánsan

nagyobb eredményt adtak. A legnagyobb N-hozamot szintén a nagy ásványi trágya adagokat tartalmazó, kombinált kezelések adták. Mindhárom kísérleti évben a talajlevegő növekvő CO₂-koncentrációi voltak mérhetőek a különböző kombinációkban szerves és/vagy ásványi trágyát kapott kezelések esetében a tenyészidőszak első felében, majd ezt követően a gázképződés csökkent. Megfigyelhető volt, hogy a talajlevegő CO₂-koncentrációja jól korrelált a mintavételt megelőző két nap átlagos napi középhőmérsékletével. A három év vonatkozó adatait Spearman-féle rank-korrelációval elemezve a regresszió értéke $r = 0,91$ ($p > 0.01$). Az éves összes CO₂-koncentráció és az éves N-bevitel között többségében szintén szoros korreláció mutatkozott ($r = 0,9$ 2008-ban; $r = 0,65$ 2009-ben, és $r = 0,93$ 2010-ben). A nagyadagú NPK-kezeléseknél illetve az ezeket tartalmazó kombinációknál a kumulatív CO₂-koncentráció átlagosan 26,2%-kal volt nagyobb a trágyázatlan kontrollhoz képest. Általánosan megállapítható, hogy a legnagyobb N-tartalmú kezelés a trágyázatlan kontrollhoz képest szignifikánsan növelte a talajlevegő CO₂-koncentrációját. Két év (2009 és 2010) eredményei azt mutatták azonban, hogy az istállótrágya vagy szalma leszántás szignifikánsan csökkentette a nagy N-műtrágya kezelés (1eqv+NPK) által kiváltott fokozott CO₂ képződést (2). Ennek oka az lehet, hogy a jelentős mennyiségű (lebomlatlan) szerves anyag jelenlétében a N beépült a képződő talaj-szerves anyagba és így nem növelte a már kész talaj-szervesanyag bomlását.

4.2. Bolygatatlan talajoszlop kísérlet

A hat bolygatatlan talajoszlopot a *PÁRTAY és munkatársai* (1992) által közöltek szerint készítettük, *in situ* preparálásukat a Pannon Egyetem Szerves- és Műtrágyázási Tartamkísérlet parcellái mellett (Keszthely), egy sok éve trágyázatlan szegélyterületén végeztük 2008 áprilisában. Az oszlopok magassága 90 cm, átmérőjük 40 cm volt. A preparált oszlopokat a MTA TAKI Órbottyáni Kísérleti Telepére szállítottuk, ahol azokat egy szerelőaknában helyeztük el úgy, hogy a talajfelszínnel egy magasságban legyenek. Az itt beállított talajoszlopokkal végeztük a kísérleteket 2008-tól 2011 végéig. A kísérlet első szakaszában, 2008-ban semmilyen kezelést nem alkalmaztunk, valamennyi oszlopba kukorica jelzőnövényt vetettünk, oszloponként 4-4 növényt neveltünk. Ezt követően 2008 őszétől három éven keresztül eltérő trágyázási kezeléseket állítottunk be, leegyszerűsítve: 1. kontroll, 2. NPK műtrágya-kezelés, 3. Kukorica növény, 4. Kukorica és NPK trágyázás, 5. Kukorica és istállótrágya, 6. Kukorica, NPK műtrágya és istállótrágya, a kezelések megfeleltek a tenyészedeny kísérlet egyes trágyázási beállításainak. A csapadék viszonyok függvényében az oszlopokat vízzel öntöztük. Az öntözésnél figyelembe vettük a területre mért 30 éves átlag csapadékot, és hozzávetőlegesen annak megfelelően pótoltuk a vizet. A gázmintavételhez az oszlopokba keresztirányban 20, 40 és 60 cm mélységben gázáteresztő szilikoncsöveket építettünk be, melyek a szakirodalom és saját vizsgálataink szerint alkalmasnak bizonyultak a kismolekulájú gázok, így a CO₂ és N₂O passzív csapdázására (*SZILI-KOVÁCS et al.*, 2009a). A felszíni gázmintavételhez PVC csőből zárt kamrát alakítottunk ki (298 cm³), ami általában nyitott, csak a mérés ideje alatt (30 perc) zárt, a mérési időszak alatt képződő gáz akkumulációjára. A tenyészedeny kísérletnél leírt módon hetente, esetenként gyakrabban vettünk gázmintákat. Talajmintavétel a vizsgálatokhoz a vegetációs időszak alatt hatszor-hétszer történt. A talaj mikroorganizmusok aktivitását fluoreszcein-diacetát (FDA) hidrolitikus aktivitása alapján, a talaj aktív mikrobiális biomasszáját pedig szubsztrát-indukált respirációval (SIR) határoztuk meg (*SZILI-KOVÁCS et al.*, 2011b). Eredetileg 2008 és 2010 között terveztük elvégezni a vizsgálatokat, azonban ezt még egy évvel meghosszabbítottuk. Ezt azért tartottuk célszerűnek, mert az első évben (2008) a kezelés nélküli oszlopokat hasonlítottuk össze. A kezeléseket követő két év időjárása szélsőségesen különbözött egymástól továbbá a rendelkezésre álló idő és pénzügyi keret lehetővé tette még egy szezont vizsgálatát (2011).

Az adatokat kéttényezős illetve háromtényezős varianciaanalízissel értékeltük, ahol a talajmélység volt az egyik, és a kezelés a második tényező, illetve a háromtényezős varianciaanalízisnél a mintavételi időpont a harmadik tényező. Az F-próba statisztikailag szignifikáns értéke után LSD és Tukey HSD posthoc teszttel vizsgáltuk meg, hogy az egyes kezelések, mélységek, vagy mintavételi időpontok a változókat szignifikánsan elkülönítik-e. A tényezők között korreláció vizsgálatot is végeztünk.

A kutatás első évében (2008) még nem alkalmaztuk az eltérő trágyakezeléseket, így az oszlopok közötti különbségeket eltérő talajnedvességük, vagy eltérő egyedi szerkezetük okozhatta (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2009a). A szén-dioxid a mélységgel szignifikánsan növekedett, az N₂O viszont a felső rétegben volt a legnagyobb, a középső és alsó rétegben nem különbözött egymástól. Az N₂O koncentrációban egy határozott csúcs jelent meg, ami egybeesett egy meleg és csapadéokban gazdag periódussal, ezért feltehetőleg a nagy nedvességtartalom miatt kialakult anaerob régiók által indukált denitrifikáció tehető felelőssé (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2009b).

A 2009. évi vizsgálatok szerint a növény jelenléte vagy hiánya nagymértékben módosította a mikrobiális biomassza és aktivitás értékét, míg a trágyakezelések hatása meglepő módon csak kismértékben érvényesült (FILEP & SZILI-KOVÁCS, 2010). A műtrágya és istállótrágya kezelések kombinációja szignifikánsan és nagymértékben megnövelte a talaj mikrobiális aktivitását a többi kezeléshez képest. A növény magasságot, a növényi produkciót, a szár és a levél tömegét a műtrágya és istállótrágya kezelések egyaránt megnövelték, a legnagyobb különbségek a levéltömegben adódtak, de a beltartalomban is kialakultak szignifikáns különbségek.

2010-ben újdonságként az oszlopok tetejére felszíni gázmintavételi csöveket helyeztünk, ami nyitott, csak a gázmintavétel idejére zárt. Ezzel a talajfelszínről a légkörbe jutó széndioxid mennyiségét határoztuk meg (SZILI-KOVÁCS *et al.* 2011a). A talajnedvességet beépített szondával hetente feljegyeztük. Ezen kívül talajnedvességet mértünk a biológiai aktivitás vizsgálatára vett talajmintákból is. A talaj mikrobiális biomassza és aktivitás vizsgálatát szubsztrát indukált respiráció május 3. és szeptember 1. között 6 időpontban végeztük el a 0-20 cm mélységből vett talajmintából. A SIR és FDA aktivitások értékét a kezelések szignifikánsan befolyásolták, ugyanakkor az egyes kezelések hatásai nem mindig különültek el egymástól. A nyári időszakban az istállótrágyás kezelések egyértelműen nagyobb mikrobiális biomasszát és aktivitást eredményeztek. Ugyanakkor a növény jelenlétének a hatása nem mutatható ki sem a SIR, sem az FDA értékében. A SIR legalacsonyabb a növény nélküli NPK kezelt talajban volt, ezt követte a növény nélküli kontroll, a növényes kontroll és a növényes NPK kezelt talaj. Ezeknél szignifikánsan nagyobb volt SIR az istállótrágyával kezelt talajban és a legnagyobb az istállótrágya+ NPK kezelt talajban volt. Az FDA az istállótrágyával kezelt talajokban szignifikánsan nagyobb volt, mint a többi kezelésnél, de a két istállótrágya-kezelés variáns nem különbözött szignifikánsan. A SIR és FDA között szignifikáns korrelációt tapasztaltunk ($r = 0,68$; $p=0,00004$), bár a kezelésekre adott válaszok több esetben eléggé eltérőek voltak ennél a két változónál. A felszíni CO₂ fluxus értékeit a talajhőmérséklet nagymértékben befolyásolta. Az összesen 141 napos periódus közben három CO₂ csúcs jelentkezett a 9-11. nap között, a 86. napon, továbbá a 37. napon. kezeléseknél. A CO₂ fluxus átlagértékei 21 és 2052 mg CO₂/m²/óra között változtak. A SIR és a felszíni CO₂ fluxus közötti korreláció szignifikáns volt ($r = 0,39$; $p=0,033$), továbbá az FDA és CO₂ fluxus közötti is ($r = 0,49$; $p=0,006$). A növényi produkcióban és beltartalomban a 2009. évivel megegyező hatásokat kaptunk.

2011-ben már 20 időpontban végeztünk felszíni CO₂ fluxus mérést, párhuzamosan a talajoszlop belsejében mért CO₂ és N₂O koncentrációval. Ez jobb felbontást eredményezett, és így a kezelések valamint a környezeti tényezők hatása is pontosabban értelmezhető. Az előző évhez képest nem három, hanem hat időpontban mértünk kiugró fluxus adatokat. A

korábbi évhez képest a növény nélküli, és a növényt tartalmazó oszlopokban mért CO₂ fluxus különbsége nagyobb volt. Ez feltehetően azzal magyarázható, hogy az aktív rizoszféra mellett, még az előző évről maradt gyökér maradvány bomlása is hozzájárult a CO₂ produkcióhoz. A műtrágya-kezelés a növény nélküli talajban lecsökkentette, míg a kukorica növényt tartalmazó talajban megnövelte a CO₂ kibocsátást a kontrollhoz viszonyítva. Egy-két időpont kivételével a szervesztrágya+műtrágyakezelés eredményezte a legnagyobb CO₂ kibocsátást, különösen a vetés utáni 48., 64. és 78. napokon. A CO₂ fluxus átlagértékei 12 és 2048 mg CO₂/m²/óra között változtak (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2012 közlésre elküldve). A szubsztrát indukált respiráció a kezelések és a mintavételi időpont szerint is szignifikáns eltérést mutatott. A hat kezelés közül öt szignifikánsan eltért egymástól. A legalacsonyabb a növény nélküli NPK kezelt, ezt követte a növény nélküli kontroll, ezután a növényes kontroll és a növény+NPK nem különbözött szignifikánsan, ezután az istállótrágya-kezelés végül a legnagyobb értéket az istállótrágya+NPK kezelés adta. A SIR-t a hét mérési időpontnak megfelelően elkülönülten kiértékelve a következő megállapítások tehetők: a két növény nélküli kezelés szubsztrát indukált respirációja általában szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a növényt tartalmazó oszlop-kezelések talajmintáiból mért érték. Habár minden időpontban a NPK kezelt növény nélküli talajminták SIR-ja kisebb volt a növény nélküli kontrollban mérthez képest, a különbség statisztikailag nem volt szignifikáns. A növényt tartalmazó kontroll és NPK kezelést összehasonlítva időpontonként eltérő eredményt kaptunk, több esetben a két kezelés egymástól szignifikánsan eltért. Úgy tűnik, hogy a vegetációs időszak elején az NPK kezelésnél volt alacsonyabb a SIR, míg a vegetációs időszak közepe, vége felé már magasabb volt a kontrollhoz képest. Az istállótrágyával kezelt talajokban mért SIR általában szignifikánsan nagyobb volt a többi kezeléshez képest. Az istállótrágya+műtrágya-kezelésnél mért SIR minden esetben nagyobb volt, mint a csak istállótrágyával kezeltnél, bár a különbség nem minden időpontban volt szignifikáns (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2012 közlésre elküldve). A fluoreszcein-diacetát hidrolitikus aktivitás (FDA) a SIR-hez képest részben hasonló, részben eltérő eredményt adott. Itt is megfigyelhető, az időpontok és a kezelések szerinti szignifikáns eltérés. Az időpontokat tekintve itt is a vegetációs időszak elején volt alacsonyabb az FDA és később növekedett, de a legnagyobb és egyben szignifikánsan eltérő aktivitást az utolsó időpontban mértük. A legalacsonyabb FDA-t a növény nélküli kontroll és NPK kezelés valamint a növényt tartalmazó NPK kezelés adta, melyek egymástól nem tértek el szignifikánsan, de itt is a növény nélküli NPK kezeltben volt a legkisebb az FDA, majd ezt követte a növény nélküli kontroll. Ezeknél szignifikánsan nagyobb értéket mutatott a NPK műtrágyázott és istállótrágyával kezelt talaj, ezek nem különböztek egymástól szignifikánsan, és végül az istállótrágya+NPK kezelésnél volt az FDA a legnagyobb. Összességében 2011-ben mind a FDA és a SIR is jobban elkülönült egymástól az eltérő kezelések hatására a 2010. évi eredményekhez képest. Ennek valószínűleg az lehetett az oka, hogy a kezelések kumulatív hatása egyre jobban elkülöníti egymástól a talajokat az egymást követő évek alatt, legalább is a FDA és SIR mérések adatai ezt mutatják (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2012 közlésre elküldve).

A FDA és SIR közötti korrelációs együttható értéke 2010-ben 0,68 míg 2011-ben 0,539 volt. Azonban időpontonként nagyon eltérően alakult a korrelációs együttható értéke. Az FDA és SIR eredmények összehasonlítása során azt is figyelembe kell venni, hogy az FDA az "összes mikrobiális aktivitás"-t mutatja, azonban a hidrolíziséért felelős enzimek lehetnek mikrobiális vagy akár növényi eredetűek is, ugyanakkor a SIR a "metabolikusan aktív mikrobiális biomassza" jellemzője. A SIR meghatározása során glükózt alkalmazunk szénforrásként, és az aktívan működő mikroorganizmusok nem mindegyike képes a glükóz hasznosítására, ezért a glükózt hasznosító populáció nem biztos, hogy pontosan tükrözi az összes aktív mikrobiális biomasszát. Arról sincsenek információink, hogy az FDA illetve a SIR mennyire érzékeny a talajnedvesség és talajhőmérséklet kezdeti állapotára. Ezek a tényezők feltehetőleg

befolyásolják a két mikrobiális változó egymáshoz viszonyított korrelációját, és talán ezek valamelyike vagy összességében ezek miatt kaptunk időpontonként eltérő mértékű korrelációt (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2012 közlésre elküldve).

A bolygatatlan talajoszlopokkal végzett kísérlettel kapcsolatban néhány kritikai megállapítást is érdemes megtenni. A bolygatatlan talajszerkezet megőrzése az eredeti talajállapotban végbemenő folyamatokat jól modellezi. Azonban éppen ebből fakadóan az egyedi talajoszlopok nagyon különbözőek, és ezért a mért értékek szórása is nagy lesz, és ez elfedheti az egyes talajkezelések hatásának a megfigyelését. Ezzel szemben rétegenként újrátömörített talajoszlop előállításával a talajoszlopok közötti heterogenitás lecsökkenthető, és így a kezelések hatása jobban kimutatható lenne, ugyanakkor a vizsgálatok eredményeit a bolygatott talajok miatt nehéz a természetes talajviszonyokra vonatkoztatni.

4.3. A CO₂ és N₂O gázprodukciónak összehasonlítása tenyészedény és bolygatatlan talajoszlopban

A bolygatatlan talajoszlopban és a tenyészedényekben észlelt CO₂ gázprodukciónak a tenéyzsidő folyamán egyaránt kezdeti stagnálás után egy, vagy több maximum elérése után a kezdeti szintre csökken. Ezek a változások mindkét esetben jó korrelációt mutattak a napi középhőmérséklet változásával (SZILI-KOVÁCS *et al.*, 2009 ; HOFFMANN *et al.*, 2012). Az N₂O produkcionak időbeli változásának iránya a talajoszlopokban nem mutatott egyértelmű tendenciát, míg a tenyészedényekben jól mérhető növekedést csak a vetést követő 6. napig tapasztaltunk a CO₂ –képződés stagnálási periódusában. Ezt az időbeli eltolódást a két gáz képződésének dinamikájában mikrokozmosz kísérleteink is megerősítették (KAMPFL *et al.*, 2007). A bolygatatlan talajoszlopokban a felszíntől 40 cm mélységig a CO₂ koncentrációnak erősen nő, s 40-60 cm között már nem változik számottevően. Ugyanez a tendencia mutatkozott az N₂O koncentrációnak is, de a nagyobb mérési bizonytalanság miatt kevésbé egyértelműen. A tenyészedényekben a felszínen és a 20 cm mélyen elhelyezett csapdák között ugyancsak növekedett a CO₂ koncentrációnak, s az itt mért értékek nagyságrendileg megegyeztek a talajoszlopban 20 cm mélyen mért értékekkel. Az N₂O mélységi változása a tenyészedényekben nem volt igazolható. A talajoszlopból a felszínen kilépő emisszió mérése és a mélységi eloszlási profil összekepcsolása lehetőséget nyújt a CO₂-diffúzió modellezésére, erre a 2011-ben és 2012-ben kapott eredmények jó alapot teremtettek. A mérések alapján számított CO₂-emisszió értékek nagyságrendileg megegyeznek a szakirodalomban közölt, hasonló körülmények között mért értékekkel (GALBALLY *et al.*, 2008). A trágyázatlan kezelésekben a növények jelenléte mind a talajoszlopban, mind a tenyészedényekben növelte a CO₂ és az N₂O produkciót. A trágyázási kezelések hatására a talajoszlopokban csökken mind a két gáz produkciójak. Szerves trágya alkalmazása és növény jelenlétében ez a csökkenés kisebb mértékű, mint ásványi trágya esetében. Ezzel ellentétben a trágyázási kezelések hatására a tenyészedényekben növények jelenlétében egyértelműen növekedett a CO₂ produkciónak, és kevésbé egyértelműen az N₂O produkciónak is. A növekedés a trágyakezelések terménynövelő hatása sorrendjében (istállótrágya < ásványi trágya < istállótrágya+ásványi trágya) fokozódott (HOFFMANN *et al.*, 2012). Összegezve megállapítható, hogy a CO₂ és N₂O gázképződés és a talajból történő kilépés feltételei a bolygatatlan és a művelt talajban eltérnek, s e folyamatra jelentős hatással van a növények jelenléte és anyagcseréje és a talaj mikrobiológiai aktivitása. Kísérleteink eredményeként létrehoztunk egy olyan adatbázist, amelyre alapozva megfelelő matematikai modellek alkalmazásával reálisan becsülhető a mezőgazdasági talajok CO₂ és N₂O emissziójak különböző tápanyagellátási és művelési módok esetén.

4.4. A CO₂-, N₂O- és NO_x-gázemisszó modellezése laboratóriumi mikrokozmosz kísérletekben

A tenyészedény és bolygatatlan talajoszlop kísérletek tervezését laboratórium mikrokozmosz kísérletekkel alapoztuk meg, s a tapasztalt hatások értelmezésére a program előrehaladása során további mikrokozmosz kísérleteket végeztünk. Zárt laboratóriumi kísérleti modellben (1200 cm³) elhelyezett 100-200 g talaj fölötti térben vizsgáljuk a gázösszetétel változását (NO, N₂O, CO₂) 30-60 napig tartó inkubálás folyamán. A kísérletekben az alábbi kezeléseket alkalmaztuk: (A) szervesetlen N-forrás (KNO₃, NH₄NO₃), (B) szervesanyag (istállótrágya, növényi szarmaradvány), (C) talajállat (*Collembola*, *Enchytraeus*), (D) inhibitorok (nehézfém Pb, Cu, Cd), (E) vízellátás (60 és 90 % maximális vízkapacitás), (F) hőmérséklet (15, 27, 37 °C). Eredményeink nagy részét már publikáltuk (*KAMPFL et al.*, 2007; *KRISTÓF et al.*, 2008; *ALGAIDI et al.*, 2008; *ALGAIDI*, 2009; *BAYOUMI et al.*, 2012), s ezért itt csak összefoglaló jelleggel ismertetjük. A CO₂-, N₂O- és NO-produkció időbeli lefutását és mértékét a talaj víztelítettsége és a hőmérséklet minden tápanyag és inhibitor kezelésben nagymértékben befolyásolta. A CO₂-koncentráció általában telítési jellegű görbe szerint változott, a telítési érték a hőmérséklet és a víztelítettség növekedésével nagymértékben növekedett, 15 °C-on hasonló nagyságú volt, mint a tenyészedényekben a kezdeti stagnálási időszakban mért érték, 28 °C-on mint a tenyészedények maximális produkciója időszakában mért értékek, 37 °C-on ennek kétszeresét is elérte. A szerves anyag hozzáadása, illetve talajállatok jelenléte növelte, az ásványi nitrogénforrás és nehézfém hozzáadása csökkentette a CO₂-produkciót. A kontrollban és a szerves anyagot tartalmazó kezeléseknél az NO- és N₂O-koncentráció az idő függvényében általában maximumgörbe szerint változott, az NO az 5.-14., az N₂O a 8.-20. napon érte el a maximumot. A maximum értéke a hőmérséklet és a víztelítettség növekedésével többszörösére növekedett, s ilyenkor többszörösen meghaladta a bolygatatlan talajoszlopban mért értékeket. Az ásványi nitrogénforrás (KNO₃) hatására ez a kép teljesen megváltozott: az NO és N₂O-produkció mindaddig nem volt észlelhető, amíg a kontrollban ez be nem fejeződött. Ezt követően a magasabb hőmérsékleteken (27 és 37 °C) telítési jelleggel növekedni kezdett, de a telítési érték töredéke volt a kontrollban észlelt maximumnak. A nehézfémek hozzáadása minden kezelésben növelte, a talajállatok jelenléte viszont nem változtatta meg szignifikánsan az NO- és N₂O-produkciót. Ezek az eredmények jól egyeznek a tenyészedény és talajoszlop kísérletekben tapasztalt hatásokkal, s ugyanakkor rávilágítanak arra is, hogy a gázképződési folyamatokban körülményeink között meghatározó a denitrifikáció folyamata.

4.5. Módszerfejlesztési eredmények, alkalmazások

A mikrokozmosz kísérletekhez kapcsolódva végeztük el a kemilumineszcenciás NO-meghatározási módszer és a gázkromatográfiás N₂O és CO₂ mérés validálását, s a víz zavaró hatásának kiküszöbölését (*KAMPFL et al.*, 2007; *KAMPFL et al.*, 2008). Továbbfejlesztettük és validáltuk talajba juttatott nehézfémek biológiailag hozzáférhető frakciójának meghatározására szolgáló szekvens extrakciós módszereket (*HORVÁTH et al.*, 2010; *HORVÁTH et al.*, 2012). A kemilumineszcenciás NO-meghatározást és a nehézfémek frakcionálására kifejlesztett módszereket más (fitoremediációs) kutatási projektben is eredményesen alkalmaztuk (*GYULAI et al.*, 2012).

A különböző kísérleti rendszereinkben a képződő gázok emisszóját döntően meghatározzák a folyadék és gázfázisú komplex transzportfolyamatok. E témakörökben az OTKA témákra is alapozva, nemzetközi együttműködésben hosszabb ideje folytatunk elméleti és kísérleti kutatásokat. A talajszerkezet gázdiffúzióra gyakorolt hatásának gázkromatográfiás és komputertomográfiás vizsgálatában már jelentős eredmények születtek, amelyeket a

talajoszlopok kísérleteinkben kimutatott vertikális irányú gázdiffúzió modellezésében kívánunk felhasználni (GYARMATI *et al.*, 2010).

5. Összegezés

Kutatási célkitűzéseinket teljesítettük, létrehoztunk egy olyan adatbázist és kísérleti rendszert, amely lehetővé teszi a mezőgazdaságilag hasznosított talajok CO₂, N₂O és NO_x produkciójának és emissziójának kvantitatív becslését hazai ökológiai viszonyaink között. Az agrokémiai kísérletek követelményeinek megfelelően legalább hároméves adatsorokkal rendelkezünk, s a futamidő végére elvégeztük ezek elsődleges statisztikai feldolgozását. A részeredményeket, s a metodikai fejlesztések eredményeit a futamidő alatt folyamatosan publikáltuk, s jelentésünkkel egyidejűleg megkezdtük az adatbázis és az összegező értékelés közlését is. A közlésre beküldött közlemények megjelenését később tudjuk csatolni, s további közleményeket tervezünk még a transzportfolyamatok modellezése területén. Metodika fejlesztésben elért eredményeinket más területen is sikeresen alkalmaztuk. Munkánk eredményeit hasznosítottuk az egyetemeinken folyó tudományos képzésben (MSc, PhD), a futamidő alatt eddig egy PhD értekezés készült el, s további három a témához kapcsolódó értekezés várható a 2012-es év végéig.

IRODALOMJEGYZÉK

- ALGAIDI A. A., BAYOUMI HAMUDA H.E.A.F., HORVÁTH M., NÓTÁS E., HELTAI GY.: 2008. A hőmérséklet hatása nehézfémekkel szennyezett talajok gázkibocsátására. *Agrokémia és Talajtan*, 57, 147-160.
- ALGAIDI A. A.: 2009. Predicting NO, N₂O and CO₂ emission from agricultural soil through related environmental parameters, PhD dissertation, Szent István Egyetem, Környezettudományi Doktori Iskola, www.doktori.hu.
- BAYOUMI HAMUDA HE.A.F., MOLNÁR E., HELTAI GY.: 2012. Impacts of ecological factors on the rates of soil nitrogen mineralization and nitrification in clay loam brown forest soil. *Proceedings of IX. National Scientific Conference with International Participation "Ecology & Health 2012" 17th – 19th May 2012. Plovdiv, Bulgaria.* pp: (article under press).
- CONRAD R.: 1996. Soil microorganism as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CH₄, OCS, N₂O, and NO), *Micro-biological Reviews*, 60, 609-640.
- COUNCIL DIRECTIVE of 12 DECEMBER 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC)
- DELMAS R., SERCA D., JAMBERT C.: 1997. Global inventory of NO_x sources, *Nutr. Cycling Agroecosys.*, 48, 51-60.
- EMISSIONS DATABASE FOR GLOBAL ATMOSPHERIC RESEARCH (EDGAR); <http://ies.jrc.ec.europa.eu/data-portals.html/#dp25>.
- FILEP T., SZILI-KOVÁCS T. :2010. Effect of liming on microbial biomass carbon of acidic arenosols in pot experiments. *Plant Soil and Environment* 56, 268–273.
- FROLKING S. E., MOSIER R. A., OJIMA D. S., LI C., PARTON W. J., POTTER C.S., PRIESACK E., STENGER R., HABERBOSCH C., DÖRSCH P., FLESSA H., SMITH K. A.: 1998. Comparison of N₂O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 52, 77-105.
- GALBALLY I. E., MEYER C. P., WANG Y. P., KIRSTINE W. K., SMITH C. J., WEEKS I. A.: 2008. Measurements of Soil-Atmosphere Exchange of CH₄, CO, N₂O and NO_x in the Semi-arid Mallee System in Southeastern Australia, Centre for Australian Weather and Climate Research, Technical Report No 002 (2008) 1-62 oldal, ISBN: 978 192 142 4588.
- GALBALLY J. E., ROY C. R.: 1978. Loss of fixed nitrogen by nitric oxide exhalation. *Nature*, 275, 734-735.
- GANZVELD L., LELICVELD J., DENTENER F. J., KROL M. C., BOUWMAN A. F., ROELOFS G. J.: 2002. The influence of soil biogenic NO_x-emissions on the global distribution of reactive trace gases: the role of canopy processes., *J. Geophys. Res.*, 107, 1029-1289.
- GANZVELD L.: 2005. Soil-biogenic NO_x emissions: global scale inventories, *GEA Review* 02/28/05, <http://www.geiacenter.org/>.
- GEIA GLOBAL EMISSIONS INITIATIVE; <http://www.geiacenter.org/>.
- GHG AFOLU: Action 24002-Greenhouse Gases in Agriculture, Forestry, and Other Land Uses Action; <http://ies.jrc.ec.europa.eu/index.php?page=63>.
- GYARMATI B., KAMPFL GY., FÖLDES T., TOKAI R., KUSLITS M., STANGE F., BÁLINT Á.: 2010. Study on vertical distribution of N₂O and SF₆ gases in quasi-undisturbed soil, 16th Workshop on Energy and Environment, p. 13., November 11-12, 2010, Gödöllő, Hungary

- GYULAI G., BITTSÁNSZKY A., WATERS L., KAMPFL GY., GULLNER G., HELTAI GY., KŐMÍVES T.: 2012. Phytoextraction of sodium, zinc and sulfur by 35S-gshI transgenic poplar (*Populus × canescens*): effects of paraquat, nitric oxide and salt in vitro., *Int J Phytoremediation* (submitted).
- HALL S.J., HUBER D., GRIMM N.B.: 2008. Soil N₂O and NO emissions from arid and urban ecosystem, *J. Geophys. Res.*, **113**, G01016, doi:10.1029/2007JG000253.
- HELTAI GY., ANTON A., HOFFMANN S., BÁLINT Á., SZILI-KOVÁCS T., BEREZ K., KAMPFL GY., KRISTÓF K., MOLNÁR E., HORVÁTH M. : 2012. Az ásványi és szerves trágyázás hatása a CO₂ és N₂O gázok képződésére mezőgazdasági talajokban. *Agrokémia és Talajtan*, (közlésre benyújtva).
- HOFFMANN S., BEREZ K., HOFFMANN B., BANKÓ L.: 2008. Yield response and N-utilization depending on crop sequence and organic or mineral fertilization. *Cereal Res. Commun. Suppl.*, **36**(1), 1631-1634.
- HOFFMANN S., BEREZ K., BÁLINT Á., KRISTÓF K., KAMPFL GY., HELTAI GY.: 2012a. Ásványi és szerves trágyázás néhány agronómiai és környezeti hatásának összehasonlító vizsgálata szántóföldi- és tenyészedény-kísérletben, *Agrokémia és Talajtan*, (közlésre benyújtva).
- HOFFMANN S., LEPOSSA A.: 2012b. Impact of mineral and organic fertilization on the yield, C-content in the soil, as well as on C-, N- and energy balances in a long-term field experiment. *Archives of Agronomy and Soil Sciences*, Supplement 11. (közlésre elfogadva).
- HOFFMANN S., LEPOSSA A., BÁLINT Á., MOLNÁR E., HELTAI G.: 2012c. Comparative study of some agronomic and environmental effects of mineral and organic fertilization with maize (*Zea mays* L.) in field and model pot experiments. *Proceedings of 19. ISTRO Conference*, Montevideo 2012. (közlésre elfogadva).
- HORVÁTH M., BOKOVÁ V., HELTAI GY., FLÓRIÁN K., FEKETE I.: 2010. Study of application of BCR sequential extraction procedure for fractionation of heavy metal content of soils, sediments, and gravitation dusts., *Toxicological & Environmental Chemistry*, **92** (3), 429-441.
- HORVÁTH M., HALÁSZ G., KUCANOVÁ E., KUCIKOVÁ B., FEKETE I., REMETEIOVÁ D., HELTAI GY., FLÓRIÁN K.: 2012. Sequential extraction studies on aquatic sediment and biofilm samples for the assessment of heavy metal mobility., *Microchemical Journal* (June 2012), doi:10.1016/j.microc.2012.05.024 Key: citeulike:10728760.
- HUTCHINSON G. L., VIGIL M. F., DORAN J. W., KASSEVALOU A.: 1997. Coarse-scale soil.atmosphere NO_x modeling: status and limitations, *Nutr. Cycling Agroecosys.*, **48**, 25-35.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change; <http://www.ipcc.ch/index.htm>.
- KAMPFL G., KRISTOF K., ALGAIDI A.A., HAMUDA H.E.A.F.B., HELTAI G.: 2007. Examination of NO_x and CO₂ production in agricultural soils, *Microchemical Journal* **85** (1): 31-38.
- KAMPFL GY., KRISTOF K., BALINT A., TORKOS K., DEBRECZENI K., HELTAI GY.: 2008. . *Geophysical Research Abstracts*, Volume **10**, Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly , Vienna, Ausztia, 2008.04.13-2008.04.18.
- KRISTÓF K., KAMPFL GY., CSERHÁTI M., HARKAI P., HELTAI GY. : 2008. Influence of different nutrient sources and microbial activity on the NO, N₂O and CO₂ emission of soil. *Cereal Research Communications*, **36**, 1071-1074.

- LOKUPITIYA E., PAUSTIAN K.: 2005. Agricultural soil greenhouse gas emissions, *Journal of Environmental Quality*, 35(4), 1413-1417.
- MARTIN R. E., SCHOLLES M. C., MOSIER A. R., OJIMA D. S., HOLLAND E. A., PARTON W. J.: 1998. Controls on annual emissions of nitric oxide from soils of the Colorado Shortgrass steppe, *Global Biogeochemical Cycles*, 12 (1), 81-91.
- PÁRTAY G., NÉMETH T., BÚZÁS I., LUKÁCS A.: 1992. A gázfázis vizsgálata bolygatatlan szerkezetű talajoszlopban, kvadrupol tömegspektrométerrel, *Agrokémia és Talajtan*, 41, 299-321.
- ROWLINGS D., GRACE P., KIESE R., SCHEER C.: Quantifying N₂O and CO₂ emissions from a subtropical pasture, 2010.19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
- SCHINDLBACHER A., ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S., BUTTERBACH-BALL K.: 2004. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂ and N₂O emissions from European forest soils, *J. Geophys. Res.*, 109, D17302, 12pp.
- STEWART D. J., TAYLOR M. C., REEVES C. E., MCQUAID J. B.: 2008. nitrogen oxide emissions from soils: impact on NO_x and ozone over West Africa during AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis): observational study, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2285- 2297.
- SZILI-KOVÁCS T., BÁLINT Á., KAMPFL GY., KRISTÓF K., NÓTÁS E.: 2009a. Development of silicone tube soil air sampler to study water stress in soil monoliths. *Cereal Research Communications* 37, 419–422.
- SZILI-KOVÁCS T., BÁLINT Á., KAMPFL GY., KRISTÓF K., HELTAI GY., HOFFMANN S., LUKÁCS A., ANTON A.: 2009b. Szilikoncső alkalmazása talajlevegő mintavételhez bolygatatlan talajoszlopokban a CO₂- és N₂O-koncentráció meghatározáshoz, *Agrokémia és Talajtan*, 58, 359-368.
- SZILI-KOVÁCS T., MOLNÁR E., VILLÁNYI I., BÁLINT Á., HELTAI GY., ANTON A.: 2011a. Soil respiration and microbial activity of undisturbed soil columns under different nitrogen management. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica* 58, 224–225.
- SZILI-KOVÁCS T., KÁTAI J., TAKÁCS T.: 2011.b Mikrobiológiai indikátorok alkalmazása a talajminőség értékelésében. 1. Módszerek. *Agrokémia és Talajtan* 60, 273–286.
- SZILI-KOVÁCS T., MOLNÁR E., VILLÁNYI I., KNÁB M., BÁLINT Á., HELTAI GY., ANTON A.: 2012. Substrate induced respiration and FDA hydrolyzing activity of soil columns with different nitrogen additions. *Plant Soil and Environment* (közlésre elküldve).
- YAN X., OHARA T., AKIMOTO H.: 2005. Statistical Modeling of Global Soil NO_x Emission. *Global Biogeochemical Cycles*, 19 (3), GB 3019 .
- YANG Z. P., TURNER D. A., ZHANG J. J., WANG Y. L., CHEN M. C., ZHANG Q., DENMEAD O. T., CHEN D., FRENEY J. R.: 2011. Loss of nitrogen by ammonia volatilisation and denitrification after application of urea to maize in Shanxi Province, China, *SOIL RESEARCH*, Volume: 49 Issue: 5 Pages: 462-469 DOI: 10.1071/SR11107.
- YINGER J. J., LEVY H.: 1995. II. Global inventory of soil biogenic NO_x emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 11447-11464.

